

MENU

SEARCH

INDEX

DETAIL

1/1



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number: 09320932

(43)Date of publication of application: 12.12.1997

(51)Int.Cl.

H01L 21/027
G03F 7/20

(21)Application number: 08132988

(71)Applicant:

NIKON CORP

(22)Date of filing: 28.05.1996

(72)Inventor:

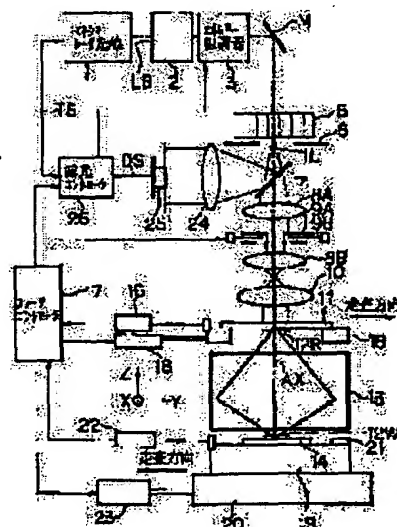
OZAWA KEN

(54) METHOD AND DEVICE FOR CONTROLLING EXPOSURE AMOUNT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To finely modulate an exposure amount on a photosensitive board rapidly without using an energy fine modulator which finely adjust a transmission factor by mechanical driving and without involving energy loss of illumination light on an optical path.

SOLUTION: A reticle 11 is illuminated by dimming pulse illumination light from an excimer laser light source 1 by an energy coarse adjuster 3 and the reticle 11 and a wafer 14 are scanned to a projection optical system 13. Thereby, a pattern image of the reticle 11 is replicated successively to each shot region on the wafer 14. An integrator sensor 25 for monitoring an exposure amount on the wafer 14 indirectly and an energy monitor for monitoring energy of pulse illumination light inside the excimer laser light source 1 are provided and light emission power of the excimer laser light source 1 is finely modulated based on measurement results by the integrator sensor 25.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]
[Date of sending the examiner's decision of rejection]
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
[Date of final disposal for application]
[Patent number]
[Date of registration]
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998 Japanese Patent Office

MENU

SEARCH

INDEX

DETAIL

特開平9-320932

(43) 公開日 平成9年(1997)12月12日

(51) Int. Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H01L 21/027			H01L 21/30	516 D
G03F 7/20	521		G03F 7/20	521
			H01L 21/30	515 D
				515 B
				516 C

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全17頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平8-132988

(22) 出願日 平成8年(1996)5月28日

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 小澤 謙

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

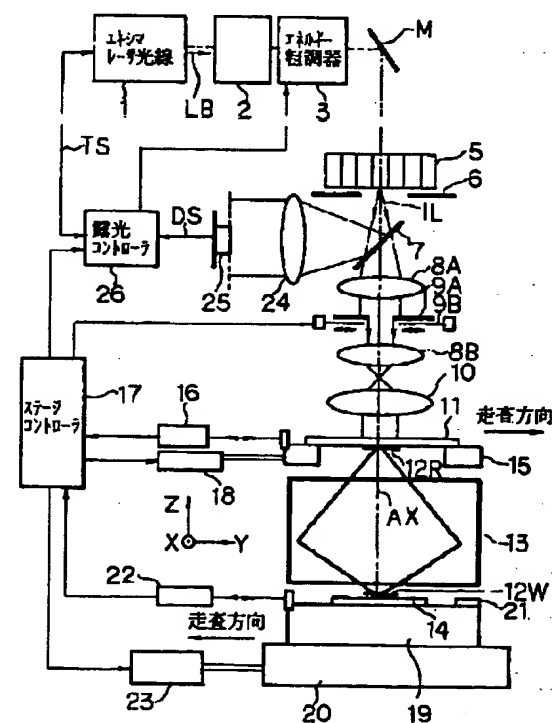
(74) 代理人 弁理士 大森 聡

(54) 【発明の名称】 露光量制御方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 機械的な駆動によって透過率を微調整するエネルギー微変調器を使用することなく高速に、且つ照明光の光路上でのエネルギー損失を伴うことなく感光基板上での露光量を微変調する。

【解決手段】 エキシマレーザ光源1からのパルス照明光をエネルギー粗調器3で減光してレチクル11を照明し、レチクル11及びウエハ14を投影光学系13に対して走査することにより、ウエハ14上の各ショット領域にレチクル11のパターン像を逐次転写する。ウエハ14上での露光量を間接的にモニタするインテグレートセンサ25と、エキシマレーザ光源1内でのパルス照明光のエネルギーをモニタするエネルギーモニタとを設け、インテグレートセンサ25での計測結果に基づいてエキシマレーザ光源1の発光パワーを微変調する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 露光用光源から射出された照明光で、転写用パターンの形成されたマスクを照明し、前記照明光のもとで前記マスクの転写用パターンを感光基板上に転写露光する露光装置で、前記感光基板に対する前記照明光の露光量を制御する露光量制御方法において、前記露光用光源の発光パワーを所定範囲内で微変調することによって前記照明光の前記感光基板に対する露光量を制御することを特徴とする露光量制御方法。

【請求項2】 請求項1記載の露光量制御方法であって、前記感光基板上の複数のショット領域に順次露光を行う際に、それぞれ前記各ショット領域に対する前記照明光の照度をモニタし、該モニタ結果の目標値からのずれに応じて、前記感光基板上の次のショット領域への露光の際に前記露光用光源の発光パワーを微変調することを特徴とする露光量制御方法。

【請求項3】 露光用光源から射出された照明光で、転写用パターンの形成されたマスクを照明し、前記照明光のもとで前記マスクの転写用パターンを感光基板上に転写露光する露光装置で、前記感光基板に対する前記照明光の露光量を制御する露光量制御方法において、前記露光用光源の内部又は直後での前記照明光の照度と、前記感光基板上での前記照明光の照度との相関テーブルを求めておき、該相関テーブルに基づいて前記感光基板上での前記照明光の露光量を制御することを特徴とする露光量制御方法。

【請求項4】 請求項3記載の露光量制御方法であって、前記感光基板への露光を行うことなく前記露光用光源をダミー発光させたときに前記相関テーブルを求めることを特徴とする露光量制御方法。

【請求項5】 請求項3、又は4記載の露光量制御方法であって、前記露光用光源の内部又は直後での前記照明光の照度と、前記感光基板上での前記照明光の照度との相関が変化すると予測されるときに、前記相関テーブルを更新することを特徴とする露光量制御方法。

【請求項6】 請求項1、又は2記載の露光量制御方法であって、前記露光用光源はパルス発光型の光源であり、前記露光用光源の発光パワーの設定値を変更する際には、前記露光用光源の発光パワーが安定するのに必要なパルス数分だけ前記露光用光源をプリ発光させることを特徴とする露光量制御方法。

【請求項7】 露光用光源から射出された照明光で、転写用パターンの形成されたマスクを照明し、前記照明光のもとで前記マスクの転写用パターンを感光基板上に転

写露光する露光装置で、前記感光基板に対する前記照明光の露光量を制御する露光量制御装置において、前記露光用光源の発光パワーを所定範囲内で微変調する光源変調手段と、前記露光用光源の内部又は直後で前記照明光の照度を検出する第1のエネルギーモニタと、前記感光基板上での前記照明光の照度を直接又は間接に検出する第2のエネルギーモニタと、前記第1及び第2のエネルギーモニタの検出結果に基づいて前記光源変調手段を制御する制御手段と、を有することを特徴とする露光量制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、例えば半導体素子、液晶表示素子、撮像素子（CCD等）又は薄膜磁気ヘッド等を製造するためのリソグラフィ工程中で使用される露光装置で、感光性の基板に対する露光量を制御するための露光量制御方法及び装置に関し、一括露光型の露光装置にも適用できるが、特にステップ・アンド・スキャン方式等の走査露光型の投影露光装置で露光量制御を行う場合に使用して好適なものである。

【0002】

【従来の技術】従来より半導体素子等を製造する際に、マスクとしてのレチクルのパターンを投影光学系を介してフォトリソストが塗布されたウエハ（又はガラスプレート等）上の各ショット領域に転写露光する投影露光装置が使用されている。斯かる投影露光装置における1つの基本的な機能として、ウエハの各ショット領域内の各点に対する積算露光量（積算露光エネルギー）を適正範囲内に収めるための露光量制御機能がある。

【0003】従来のステッパーのような一括露光型の投影露光装置での露光量制御としては、露光光源として超高圧水銀ランプのような連続光源、又はエキシマレーザ光源のようなパルスレーザ光源の何れを使用する場合でも、基本的にはカットオフ制御が行われていた。このカットオフ制御では、感光材料が塗布されたウエハへの露光光の照射中にその露光光の一部を分岐して光電検出器よりなるインテグレートセンサに導き、このインテグレートセンサを介して間接的にウエハ上での露光量を検出し、この検出結果の積算値が当該感光材料で必要とされる積算露光量（以下、「設定露光量」と呼ぶ）に対応する所定のレベル（クリティカルレベル）を超えるまで発光を続ける（連続光の場合にはクリティカルレベルを超えたらシャッターを閉め始める）というような制御が行われる。

【0004】更に、露光光源としてパルスレーザ光源を用いる場合においては、パルスレーザ光毎にエネルギーのばらつきを有するため、或る一定数（以下、「最小露光パルス数」と呼ぶ）以上の複数のパルスレーザ光で露光することにより、所望の露光量制御精度再現性を得て

いる。この場合、例えば高感度レジストを露光する際には、設定露光量が小さいため、パルスレーザ光源からのレーザ光をそのまま使用したのでは、最小露光パルス数以上での露光ができなくなる。そこで、このように設定露光量が小さいときには、例えば光路に設置された減光手段によりパルスレーザ光を減光することにより、最小露光パルス数以上のパルス数で露光できるようにしていた。

【0005】更に近年では、投影光学系に対する負担をあまり重くすることなく、より大面積のパターンを高精度にウエハ上に転写できるようにするために、レチクルのパターンの一部を投影光学系を介してウエハ上に投影した状態で、レチクル及びウエハを投影光学系に対して同期して走査することによりレチクルのパターンをウエハ上の各ショット領域に逐次転写露光する、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置も開発されてい

$$(\text{設定露光量}) = (\text{パルス数}) \times (1 \text{ パルスの平均エネルギー}) \quad (1)$$

ここで、1パルスの平均エネルギーは露光直前にインテグレートセンサにて計測される値である。また、後者の第2の制御方式では、各パルス発光毎にパルスエネルギーを微調する必要がある。

【0007】これに関して、従来のパルスレーザ光源は、内部に光電検出器よりなるエネルギーモニタを備え、このエネルギーモニタの検出結果が外部から指示された出力エネルギー（追い込み中心エネルギー）に合致するように、レーザ電源にフィードバック制御をかけることによって、常に一定エネルギーのパルス光を出力するようにしていた。即ち、パルスレーザ光源側の追い込み中心エネルギーは固定であり、パルス光のエネルギー微変調は露光装置側のエネルギー微変調器で行っていた。

【0008】図8は従来のエネルギー微変調器を示し、図8(a)のダブル・グレーティング方式の微変調器ではパルス発光されるレーザビームLBの光路上に、所定ピッチで透過部と遮光部とが形成された固定の格子板41と、格子のピッチ方向に移動自在な可動の格子板42とが重ねて配置され、2枚の格子板41、42の相対的な位置をずらすことによって、レーザビームLBに対する透過率が微変調できるようになっている。また、図8(b)の微変調器では、レーザビームLBの光路上に、それぞれ両面に反射防止コーティングが施された2枚のガラスプレート43、44が、対称に可変の傾斜角 θ で傾斜した状態で配置されている。そして、ガラスプレート43、44の透過率がレーザビームLBの入射角に応じて変化する特性を利用して、傾斜角 θ を制御することによって、レーザビームLBに対する全体の透過率を微調整している。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】上記の如き従来の技術において、図8(a)及び(b)に示すようなエネルギー

る。このような走査露光型では、ウエハ上の1点だけに着目した露光量制御が適用できないために、上述のカットオフ制御が適用できない。そこで、従来は第1の制御方式として、単純に各パルス照明光の光量を積算して露光量制御を行う方式（オープン露光量制御方式）が使用されていた。また、第2の制御方式として、ウエハ上で走査方向に対してスリット状の照野フィールド（露光領域）に含まれる領域に対する積算露光量をパルス照明光毎にリアルタイムで計測し、その積算露光量に基づいて次のパルス照明光の目標エネルギーを個別に算出して、各パルス照明光のエネルギーを制御する方式（パルス毎露光量制御方式）も使用されていた。

【0006】前者の第1の制御方式においては、所望の露光量制御の直線性を得るために次の関係が成立するように、即ち、露光パルス数が整数になるように、パルスエネルギーを微調する必要がある。

一微変調器は、透過率を調整するためには機械的な駆動を伴うため、高速に透過率を調整することが困難であるという不都合があった。また、両者共に最大透過率は100%にはできないため、透過率最大の初期状態でもエネルギー損失が生じて、パルス光の利用効率が悪いという不都合があった。

【0010】更に、図8(a)のダブル・グレーティング方式のエネルギー微変調器では、たとえこの微変調器がオプティカル・インテグレータとしてのフライアイレンズより光源側に設置されていても、使用する照明系開口絞りの開口が小さいときは、フライアイレンズによる重畳化効果が小さくなり、その格子パターンが像面上の照度むらとして僅かながら残留してしまうという不都合もあった。なお、そのように照明系開口絞りの開口が小さいときは、コヒーレンスファクタである所謂 σ 値が小さいときを意味する。

【0011】本発明は斯かる点に鑑み、照明光の光路上で機械的な駆動によって透過率（減光率）を微調整するエネルギー微変調器を使用することなく高速に、且つ照明光の光路上でのエネルギー損失を伴うことなくその照明光のエネルギー、ひいては感光基板上での露光量を微変調できる露光量制御方法を提供することを目的とする。

【0012】また、本発明は、そのような露光量制御方法を使用できる露光量制御装置を提供することをも目的とする。

【0013】

【課題を解決するための手段】本発明による第1の露光量制御方法は、露光用光源(1)から射出された照明光で、転写用パターン(11)の形成されたマスク(11)を照明し、その照明光のもとでマスク(11)の転写用パターンを感光基板(14)上に転写露光する露光装置で、感光基板(14)に対するその照明光の露光量を制御する

露光量制御方法において、露光用光源(1)の発光パワーを所定範囲内で微変調することによってその照明光の感光基板(14)に対する露光量を制御するものである。斯かる本発明によれば、露光用光源(1)の発光パワーを直接制御することによって、機械的な駆動を伴うことなく、且つ照明光の光路上でのエネルギー損失を伴うことなくその照明光のエネルギーが微変調される。

【0014】このとき、露光用光源(1)としてパルスレーザ光源であるエキシマレーザ光源が使用された場合、感光基板(14)上の各点に対する露光パルス数を整数化するために必要なエネルギー微変調のレンジは高々±数%である。従って、エキシマレーザ光源であれば、その光源からの各パルス光の中心エネルギー(発光パワー)をその露光パルス数を整数化するためのレンジで可変とすることは可能である。

【0015】この場合、感光基板(14)上の複数のショット領域に順次露光を行う際に、それぞれその各ショット領域に対するその照明光の照度をモニタし、このモニタ結果の目標値からのずれに応じて、感光基板(14)上の次のショット領域への露光の際に露光用光源(1)の発光パワーを微変調することが望ましい。これによって、例えばショット領域間の移動中等に露光用光源(1)の発光パワーが更新される。

【0016】また、本発明による第2の露光量制御方法は、露光用光源(1)から射出された照明光で、転写用パターン形成されたマスク(11)を照明し、その照明光のもとでマスク(11)の転写用パターンを感光基板(14)上に転写露光する露光装置で、感光基板(14)に対するその照明光の露光量を制御する露光量制御方法において、露光用光源(1)の内部又は直後でのその照明光の照度(ES)と、感光基板(14)上でのその照明光の照度(P)との相関テーブルを求めておき、この相関テーブルに基づいて感光基板(14)上でのその照明光の露光量を制御するものである。

【0017】斯かる本発明によれば、例えば露光用光源内のエネルギーモニタ(1c)によって露光用光源(1)の段階での照明光の照度(ES)が検出され、露光装置側のエネルギーモニタ(25)によって感光基板(14)上での照明光の照度(P)が検出され、両エネルギーモニタ(1c、25)の出力の相関テーブルが制御テーブルとして予め求められて保持される。そして、感光基板(14)に対する露光量の制御を行うために露光用光源(1)の発光パワーの微変調を行うものとして、その微変調の際の基準は、あくまでも露光装置側のエネルギーモニタ(25)の出力とする。即ち、露光装置側のエネルギーモニタ(25)の出力とその相関テーブルとから露光用光源内のエネルギーモニタ(1c)の出力を求め、この出力に基づいて露光用光源(1)の発光パワーを微変調する。これによって、露光装置側のエネルギーモニタ(25)の出力を基準とした露光量制御

直線性(露光量の目標値と実際の露光量との間の直線性)が得られる。

【0018】この場合、感光基板(14)への露光を行うことなく露光用光源(1)をダミー発光させたときにその相関テーブルを求めることが望ましい。また、露光用光源(1)の内部又は直後でのその照明光の照度と、感光基板(14)上でのその照明光の照度との相関が変化すると予測されるときに、その相関テーブルを更新することが望ましい。

【0019】即ち、両エネルギーモニタの出力の相関関係は、経時的に変動することが予想されるので、その相関関係のずれが所定量を超える恐れのあるとき、即ち、その相関テーブルの誤差が許容量を超える恐れのあるときは、その相関テーブル作成のためのデータ取りを適宜実行して、その相関テーブルを更新することにより、長期的にも安定した露光装置側のエネルギーモニタ(25)基準の露光量制御直線性が得られる。

【0020】更に、露光用光源(1)がパルスレーザ光源である場合、所望の露光量再現性(走査露光の場合は感光基板上の1点当たりの露光量再現性)を得るために、最低限必要なパルス数(最小露光パルス数 N_{min})なるものが存在する。そこで、設定露光量と計測される1パルス当たりのエネルギーとの関係によっては光路内に設置されたエネルギー粗調器(3)によりダイナミックに減光し、 N_{min} 以上の露光パルス数で露光されるように制御する。この場合、露光用光源内のエネルギーモニタ(1c)に入射するパルスエネルギーのレンジは非常に狭いが、露光装置側のエネルギーモニタ(25)に入射するパルスエネルギーのレンジは非常に広い。例えばエキシマレーザ光源を使用するときには100倍以上である。この場合、両エネルギーモニタの相関関係はエネルギー粗調器(3)での透過率により変わるので、エネルギー粗調器(3)が入った状態で露光前のエネルギーチェックを兼ねて相関データ取りをし、その相関テーブルを作成、更新することが望ましい。これにより、いかなる設定露光量においても、露光装置側のエネルギーモニタ(25)を基準とした露光量制御直線性が得られる。

【0021】また、上述の第1、又は第2の露光量制御方法において、その露光用光源(1)がパルス発光型の光源である場合、露光用光源(1)の発光パワーの設定値を変更する際には、露光用光源(1)の発光パワーが安定するのに必要なパルス数分だけ露光用光源(1)をプリ発光させることが望ましい。例えば走査露光型の露光装置では、例えばスキャン露光動作の準備時間であるステージの加速、及び静止時間中に、視野絞りが閉まった状態にて、そのプリ発光(ダミー発光)を行うことができる。

【0022】次に、本発明による露光量制御装置は、露光用光源(1)から射出された照明光で、転写用パター

ンの形成されたマスク(11)を照明し、その照明光のもとでマスク(11)の転写用パターンを感光基板(14)上に転写露光する露光装置で、感光基板(14)に対するその照明光の露光量を制御する露光量制御装置において、露光用光源(1)の発光パワーを所定範囲内で微変調する光源変調手段(1e)と、露光用光源(1)の内部又は直後でその照明光の照度を検出する第1のエネルギーモニタ(1c)と、感光基板(14)上でのその照明光の照度を直接又は間接に検出する第2のエネルギーモニタ(25)と、それら第1及び第2のエネルギーモニタの検出結果に基づいて光源変調手段(1e)を制御する制御手段(1d, 26)と、を有するものである。斯かる本発明によれば、本発明の第1、又は第2の露光量制御方法が実施できる。

【0023】

【発明の実施の形態】以下、本発明による露光量制御方法及び装置の実施の形態の一例につき図1～図7を参照して説明する。本例は、露光用光源にパルスレーザ光源としてのエキシマレーザ光源を使用するステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置において、露光量制御

を行う場合に本発明を適用したものである。

【0024】図1は本例の投影露光装置を示し、この図1において、エキシマレーザ光源1からパルス発光されたレーザビームLBは、シリンダレンズやビームエキスパンダ等で構成されるビーム整形光学系2により、後続のフライアイレンズ5に効率よく入射するようにビームの断面形状が整形される。エキシマレーザ光源1としては、KrFエキシマレーザ光源(発振波長248nm)、又はArFエキシマレーザ光源(発振波長193nm)等が使用される。なお、露光光源として、金属蒸

気レーザ光源やYAGレーザの高調波発生装置等のパルス光源を使用しても良い。

【0025】ビーム整形光学系2から射出されたレーザビームLBは、エネルギー粗調器3に入射する。エネルギー粗調器3は、回転自在なレボルバ上に透過率(=1-減光率)の異なる複数個のNDフィルタを配置したものであり、そのレボルバを回転することにより、入射するレーザビームLBに対する透過率を100%から複数段階で切り換えることができるようになっている。なお、そのレボルバと同様のレボルバを2段配置し、2組のNDフィルタの組み合わせによってより細かく透過率を調整できるようにしてもよい。

【0026】エネルギー粗調器3から射出されたレーザビームLBは、光路折り曲げ用のミラーMを介してフライアイレンズ5に入射する。フライアイレンズ5は、後続のレチクル11を均一な照度分布で照明するために多数の2次光源を形成する。フライアイレンズ5の射出面には照明系の開口絞り(所謂σ絞り)6が配置され、その開口絞り6内の2次光源から射出されるレーザビーム(以下、「パルス照明光IL」と呼ぶ)は、反射率が小

さく透過率の大きなビームスプリッタ7に入射し、ビームスプリッタ7を透過した露光光としてのパルス照明光ILは、第1リレーレンズ8Aを経て固定照野絞り(固定レチクルブラインド)9Aの矩形的開口部を通過する。固定照野絞り9Aは、レチクルのパターン面に対する共役面の近傍に配置されている。また、固定照野絞り9Aの近傍に走査方向の位置及び幅が可変の開口部を有する可動照野絞り9Bも配置され、走査露光の開始時及び終了時にその可動照野絞り9Bを介して照野フィールドを更に制限することによって、不要な部分の露光が防止されるようになっている。

【0027】固定照野絞り9A、及び可動照野絞り9Bを通過したパルス照明光ILは、第2リレーレンズ8B、及びコンデンサレンズ10を経て、レチクルステージ15上に保持されたレチクル11上の矩形的照明領域12Rを均一な照度分布で照明する。レチクル11上の照明領域12R内のパターンを投影光学系13を介して投影倍率α(αは例えば1/4, 1/5等)で縮小した像が、フォトレジストが塗布されたウエハ14上の照野フィールド12Wに投影露光される。以下、投影光学系13の光軸AXに平行にZ軸を取り、その光軸AXに垂直な平面内で照明領域12Rに対するレチクル11の走査方向(即ち、図1の紙面に平行な方向)をY方向、その走査方向に垂直な非走査方向をX方向として説明する。

【0028】このとき、レチクルステージ15はレチクルステージ駆動部18によりY方向に走査される。レチクルステージ15上に固定された移動鏡、及び外部のレーザ干渉計16により計測されるレチクルステージ15のY座標がステージコントローラ17に供給され、ステージコントローラ17は供給された座標に基づいてレチクルステージ駆動部18を介して、レチクルステージ15の位置及び速度を制御する。

【0029】一方、ウエハ14は、不図示のウエハホルダを介してZチルトステージ19上に載置され、Zチルトステージ19はXYステージ20上に載置されている。XYステージ20は、X方向、Y方向にウエハ14の位置決めを行うと共に、Y方向にウエハWを走査する。また、Zチルトステージ19は、ウエハ14のZ方向の位置(フォーカス位置)を調整すると共に、XY平面に対するウエハ14の傾斜角を調整する機能を有する。Zチルトステージ19上に固定された移動鏡、及び外部のレーザ干渉計22により計測されるXYステージ20のX座標、及びY座標がステージコントローラ17に供給され、ステージコントローラ17は供給された座標に基づいてウエハステージ駆動部23を介してXYステージ20の位置、及び速度を制御する。

【0030】また、ステージコントローラ17の動作は、不図示の装置全体を統轄制御する主制御系によって制御されている。そして、走査露光時には、レチクル1

1がレチクルステージ15を介して+Y方向(又は-Y方向)に速度 V_1 で走査されるのに同期して、XYステージ20を介してウエハ14は照野フィールド12Wに対して-Y方向(又は+Y方向)に速度 $\alpha \cdot V_1$ (α はレチクル11からウエハ14に対する投影倍率)で走査される。

【0031】また、Zチルトステージ19上のウエハ14の近傍に光電変換素子からなる照度むらセンサ21が常設され、照度むらセンサ21の受光面はウエハ14の表面と同じ高さに設定されている。照度むらセンサ21としては、遠紫外で感度があり、且つパルス照明光を検出するために高い応答周波数を有するPIN型のフォトダイオード等が使用できる。照度むらセンサ21の検出信号が不図示のピークホールド回路、及びアナログ/デジタル(A/D)変換器を介して露光コントローラ26に供給されている。

【0032】図1において、ビームスプリッタ7で反射されたパルス照明光ILは、集光レンズ24を介して光電変換素子よりなるインテグレートセンサ25で受光され、インテグレートセンサ25の光電変換信号が、不図示のピークホールド回路及びA/D変換器を介して出力DS(digit/pulse)として露光コントローラ26に供給される。インテグレートセンサ25の出力DSと、ウエハ14の表面上でのパルス照明光ILの照度(露光量)との相関係数は予め求められて露光コントローラ26内に記憶されている。露光コントローラ26は、制御情報TSをエキシマレーザ光源1に供給することによって、エキシマレーザ光源1の発光タイミング、及び発光パワー等を制御する。露光コントローラ26は、エネルギー粗調器3を制御し、ステージコントローラ17はステージ系の動作情報に同期して可動照野絞リ9Bの開閉動作を制御する。

【0033】次に、本例の露光量制御系の構成につき図2を参照して説明する。図2は、図1の投影露光装置の露光量制御系を示し、この図2のエキシマレーザ光源1の内部において、レーザ共振器1aからパルス的に放出されたレーザビームは、透過率が高く僅かな反射率を有するビームスプリッタ1bに入射し、ビームスプリッタ1bを透過したレーザビームLBが外部に射出される。また、ビームスプリッタ1bで反射されたレーザビームが光電変換素子よりなるエネルギーモニタ1cに入射し、エネルギーモニタ1cからの光電変換信号が不図示のピークホールド回路を介して出力ESとしてエネルギーコントローラ1dに供給されている。エネルギーモニタ1cの出力ESに対応するエネルギーの制御量の単位は(mJ/pulse)である。通常の発光時には、エネルギーコントローラ1dは、エネルギーモニタ1cの出力ESが、露光コントローラ26より供給された制御情報TS中の1パルス当たりのエネルギーの目標値に対応した値となるように、高圧電源1eでの電源電圧を制御し、

この電源電圧に応じてレーザ共振器1aでの1パルス当たりのエネルギーが決定される。これによって、エキシマレーザ光源1での1パルス当たりのエネルギーが、露光コントローラ26で指示された値となる。

【0034】エキシマレーザ光源1の1パルス当たりのエネルギーは通常、所定の中心エネルギーEにおいて安定化されているが、その中心エネルギーEの上下に所定範囲で変化できるようになっている。また、エキシマレーザ光源1内のビームスプリッタ1bの外側には、露光コントローラ26からの制御情報に応じてレーザビームLBを遮光するためのシャッタ1fも配置されている。

【0035】更に、図2において、後述の制御テーブルの作成、又は更新時には、エネルギーモニタ1cの出力ESがエネルギーコントローラ1dを介して露光コントローラ26に供給され、露光コントローラ26では、エネルギーコントローラ1cの出力ESとインテグレートセンサ25の出力DSとの相関関係を求める。そして、走査露光時に露光コントローラ26は、所定の制御情報TSをエネルギーコントローラ1cに送って、エキシマレーザ光源1にパルス発光を行わせ、各パルス照明光毎にインテグレートセンサ25からの出力DSを積算して、順次ウエハ14上の各点での積算露光量を求める。そして、この積算露光量がウエハ14上のフォトレジストに対する設定露光量となるように、露光コントローラ26はエネルギー粗調器3における透過率の調整、及びエキシマレーザ光源1における1パルス当たりのエネルギーの微調整を行う。

【0036】次に、本例の投影露光装置での露光量制御動作の一例につき詳細に説明する。

(イ) 制御テーブルの作成

先ず、露光量制御のもととなる制御テーブルの作成手順を説明する。ここでは、投影露光装置本体内のインテグレートセンサ25を中心にして制御テーブルを作成するため、エキシマレーザ光源1内のエネルギーモニタ1cの出力ESの単位(エネルギー制御量の単位)を(mJ/pulse)と仮定する。上述のように、インテグレートセンサ25の出力DSの単位(エネルギー制御量の単位)は(digit/pulse)である。

【0037】この場合本例では、インテグレートセンサ25の出力DSは予め図1のZチルトステージ19上で像面(即ち、ウエハの表面)と同じ高さに設置された基準照度計(不図示)の出力に対して較正されているものとする。その基準照度計のデータ処理単位は(mJ/(cm²·pulse))なる物理量であり、インテグレートセンサ25の較正とは、インテグレートセンサ25の出力DS(digit/pulse)を、像面上の露光量(mJ/(cm²·pulse))に変換するための変換係数、或いは変換関数を得ることである。この変換係数、或いは変換関数を用いると、インテグレートセンサ25の出力DSより間接

的に像面上に与えられている露光量を計測できることになる。そこで、以下では、インテグレータセンサ25の出力DSより間接的に求められる像面上での露光量を、インテグレータセンサ25による処理量P ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)として説明する。

【0038】今、求めようとしているのは、像面上の露光量、即ち、インテグレータセンサ25の処理量P ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)と、エキシマレーザ光源1内のエネルギーモニタ1cの出力ES (mJ/pulse)との相関関係を求めることである。そのための前提条件として、

$$E = E_0 \cdot \{1 \pm (i/N_{\text{DATA}}) \times E_i / E_0\} \quad (2)$$

ここで、 E_i は必要となるエネルギー変調レンジであり、典型的には E_i / E_0 は0.02~0.03である。また、 i は整数であり、 i の値は例えば、0~ N_{DATA} の範囲で変化させる。

【0040】そして、実際に i の値を変化させながらエキシマレーザ光源1にパルス発光を行わせて、インテグレータセンサ25の処理量Pの値 P_i と、エネルギーモニタ1cの出力ESの値 E_i とを相関データ(P_i, E_i)として記録する。1つのデータは1パルスの結果でも複数パルスの平均値でも、同時計測されたデータであればどちらでもよい。

【0041】図3は、このようにして得られた相関データ(P_i, E_i)を示し、この図3において、横軸はインテグレータセンサ25の処理量の値 P_i 、縦軸はエネルギーモニタ1cの出力の値 E_i である。そして、例えば図3の相関データを補間して、インテグレータセンサ25の処理量P ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)からエネルギーモニタ1cの出力ES (mJ/pulse)を算出するための変換関数 $f(P)$ を求めるか、又はその処理量Pからその出力ESを求めるための変換係数を求め、その変換関数 $f(P)$ 又は変換係数を制御テーブルとして図1の露光コントローラ26内の記憶部に記憶する。その後、露光コントローラ26では、その制御テーブル、及びインテグレータセンサ25の処理量Pに基づいて対応するエネルギーモニタ1cの出力ESを正確に算出することができる。

【0042】以下、簡単のためインテグレータセンサ25とエネルギーモニタ1cとの相関が非常にリニアであり、相関データ(P_i, E_i)が図3の実線の直線で示すような1次関数で表され、そのオフセットは0とみなすことができ、その傾きを変換係数 β として扱えるものとする。即ち、インテグレータセンサ25の処理量P ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)、及び変換係数 β を用いて、次式よりエネルギーモニタ1cの出力ES (mJ/pulse)を算出できるものと仮定する。

$$ES = \beta \cdot P \quad (3)$$

そして、本例では図3の相関データより例えば最小自乗近似によってその変換係数 β を求め、この変換係数 β を制御テーブルとして露光コントローラ26内に記憶す

図1のエキシマレーザ光源1からのレーザビームLBの1パルス当たりのエネルギー E は、所定の中心エネルギー E_0 にて安定化されるものとする。また、エネルギー粗調器3における透過率を100% (開放) に設定するものとする。

【0039】そして、本例ではそのレーザビームLBのエネルギー E を、その中心エネルギー E_0 の上下に次のように変化させる。但し、相関データ取りに用いるデータ数を N_{DATA} としている。

る。これによって制御テーブルの作成が完了する。

【0044】(ロ) 基本的な露光量制御シーケンス次に、本例の投影露光装置における基本的な露光量制御シーケンスにつき図6のフローチャートを参照して説明する。なお、図1のエキシマレーザ光源1からのレーザビームLBに対するエネルギー粗調器3による透過率は、単に露光パルス数が必要露光パルス数以上になるように設定すればよい。ここでは、レーザビームLBのエネルギーの微変調動作に着目して説明する。

【0045】先ず、以下の説明で用いる量を次のように定義する。

(a) S_0 : オペレータが設定するウエハ上のフォトレジストに対して与えるべき露光量 (設定露光量)。

(b) N : ウエハ上の1点当たりに照射されるパルス照明光ILのパルス数 (露光パルス数)。

【0046】(c) p : 露光前にインテグレータセンサ25にて間接的に計測される像面上の平均パルスエネルギー密度 ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)。

(d) $A_{r,0}$: ウエハ上の1点当たりの露光量再現性。

(e) A_i : 設定された露光量に対する実際のウエハ上の各ショット領域内での平均露光量誤差の目標誤差 (露光量目標値精度)。

【0047】(f) A_r : ウエハ上の1点当たりの所望の設定露光量に対する積算露光量精度。即ち、次式が成立している。

$$A_r = A_{r,0} + A_i \quad (4)$$

(g) P_0 : インテグレータセンサ25を基準とした設定パルスエネルギー ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)。

【0048】(h) E_0 : 図2のエキシマレーザ光源1が露光コントローラ26から受けたレーザビームLBのエネルギー設定値 (mJ/pulse)。即ち、(3)式に対応して次式が成立している。

$$E_0 = \beta \cdot P_0 \quad (5)$$

そして、通常の露光量制御シーケンスは以下のようになる。

【0049】先ず、図6のステップ101において、オペレータが露光コントローラ26に対してウエハ上のフォトレジストに対する設定露光量 S_0 を設定する。それ

に応じて露光コントローラ26は、レーザビームLBの1パルス当たりのエネルギー設定値 E_i を中心エネルギー E_c に設定する。次のステップ102において、露光コントローラ26はエキシマレーザ光源1に複数回(例えば数100回)パルス発光を行わせて、インテグレートセンサ25の出力を積算することによって、間接的にウエハ上での平均パルスエネルギー密度 p ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)を計測する。その後、次式より露光パルス数 N を算出する。

$$【0050】 N = \text{cint}(S_0/p) \quad (6)$$

ここで、関数 cint は小数点以下1桁目の値の四捨五入を表すものとする。次に、ステップ104において、その露光パルス数 N が、必要な露光量制御再現精度を得るための最小露光パルス数 N_{\min} 以上であるかどうかを調べる。ここでは、 $N \geq N_{\min}$ であるとして、ステップ106に移行して、次式より露光量目標値精度の実測値 A_{rel} を算出する。但し、関数 ABS は絶対値を求める関数である。

【0051】

$$A_{\text{rel}} = \text{ABS}(1 - pN/S_0) \quad (7)$$

そして、ステップ107において、エキシマレーザ光源1におけるパルスエネルギーの微変調が必要であるかどうか、即ち、露光量目標値精度の実測値 A_{rel} が上記の露光量目標値精度 A_t 以上であるかどうかを調べる。そして、実測値 A_{rel} が露光量目標値精度 A_t より小さいときには、動作はステップ109に移行して露光が行われる。一方、 $A_{\text{rel}} \geq A_t$ であるときには、パルスエネルギーの微変調が必要であるため、ステップ108に移行して次式よりインテグレートセンサ25を基準とした設定パルスエネルギー P_i ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)を算出する。

【0052】

$$P_i = S_0 / \text{cint}(S_0/P) \quad (8)$$

そして、露光コントローラ26内の記憶部に制御テーブルとして保持している変換係数 β を用いて、(5)式よりエキシマレーザ光源1でのレーザビームLBのエネルギー設定値 E_i (mJ/pulse)を算出し、このエネルギー設定値 E_i を図2のエネルギーコントローラ1dに供給する。その後、ステップ109で図1の投影露光装置

$$S_k = P_k + P_{k-1} + \dots + P_{k-N+2} + P_{k-N+1} \quad (9)$$

図4は、各パルスレーザビームが照射される毎に、順次ウエハ上の1つのショット領域内の各点で得られる積算露光量 S_k を各点の走査方向の位置 Y に対してプロットしたものであり、この図4において、積算露光量 S_k は折れ線状に変化している。その積算露光量 S_k のデータより、そのショット領域中の平均積算露光量 S_{ave} 、最大積算露光量 S_{max} 、及び最小積算露光量 S_{min} を求め、これらのデータに基づいて直前に露光されたショット領域での積算露光量の結果を判定し、不良のときはその内容を判別し、次のショット領域に対する露光時にフ

においてレチクル11及びウエハ14の加速が開始され、等速の同期走査が行われるようになると、ステップ110で走査露光が行われ、ステップ111で1つのショット領域に対する露光が終了する。

【0053】本例では、エキシマレーザ光源1のパルスエネルギーを微変調しているため、高速、且つ高精度にウエハに対するレーザビームLBの露光量を制御でき、ウエハ上の各点で所望の積算露光量を得ることができる。しかも、レーザビームLBの光路上での光量損失がなく、レーザビームLBの利用効率が高い利点もある。なお、図6のステップ107で露光パルス数 N が最小露光パルス数 N_{\min} より小さくなるときには、ステップ105に移行して、図1のエネルギー粗調器3のNDフィルタを組み合わせて得られる透過率中より、 $N \geq N_{\min}$ となる透過率を選択して設定すればよい。

【0054】(ハ)制御テーブルのリアルタイム(ショット毎)更新動作

上述の(ロ)の基本的な露光量制御シーケンスは1度作成した制御テーブル、即ち、変換係数 β が系として安定して、且つ、エキシマレーザ光源1も露光コントローラ26の指示通りに動作する場合にのみ有効である。しかしながら、実際は、図2に示す露光量制御系においては、インテグレートセンサ25やエネルギーモニタ1c自体の感度の経時的変動、及びそれらの間の光学系の透過率や反射率の経時変化は何れも無視できないほどである。そこで、長期的にも安定した露光量制御を達成するために、露光以外のレーザ発光を用いた、或いは露光中にリアルタイムで取得したパルスエネルギーのデータを用いた、インテグレートセンサ25とエネルギーモニタ1cとの間の相関関係(変換関数 β)の更新が必要になってくる。基本的な考え方は、次の通りである。

【0055】即ち、露光パルス数を N 、インテグレートセンサ25での i 番目のパルスレーザビームに対する処理量 P ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)を P_i とする。そして、ウエハ上の各点での積算露光量 S_k を間接的に計測するため、各パルスレーザビームが照射される毎に、それまでの N パルス分のインテグレートセンサ25の処理量 P_i を次のように積算する。

【0056】

イードバックする。このような露光量制御を行う際に、本例では更に露光中にエネルギーモニタ1cの計測データとインテグレートセンサ25の計測データとを同時に蓄積し、露光後にエネルギーコントローラ1dは、エネルギーモニタ1cの計測データの目標値、実際の計測値、及び平均値等を露光コントローラ26に送信する。また、インテグレートセンサ25の計測データの目標値と実際の計測値とは露光コントローラ26内に蓄積されているため、露光コントローラ26では、次のようにして露光量制御の良否の判定を行う。

【0057】図7は、その場合の露光量制御動作のシーケンスを示し、この図7において、ステップ121において、前のショット領域への露光が開始され、ステップ122においてレチクル及びウエハの加速が開始され、同期が取られた後、ステップ123で走査露光が行われ、ステップ124で走査が終了している。そして、ステップ125で未露光のショット領域が存在しないときにはステップ139に示すように1枚のウエハへの露光が終了する。一方、ステップ125で未露光のショット領域があるときには動作はステップ126に移行し、次のように必要に応じて制御テーブルの更新が行われる。

【0058】また、ステップ123の走査露光時には、各パルス照明光が照射される毎に、それまでのNパルス分のインテグレータセンサ25の処理量 P_i を積算することによって(9)式の積算露光量 S_i が求められて記憶されている。このように記憶された積算露光量 S_i を図4の積算露光量 $S_1 \sim S_n$ とする。露光結果として重要なのは、これらが設定された露光量に対して許容範囲内にあるか否かである。そのため、ステップ126において、直前のショット領域の露光量が不良か良好かを判別する。即ち、i番目($i=1 \sim n$)の積算露光量 S_i

$$A_{r,i} = (S_{max} - S_{min}) / (S_{max} + S_{min}) \quad (11)$$

そして、得られた露光量再現性 $A_{r,i}$ を露光量再現性の規格値 $(A_{r,i})_{spec}$ と比較し、 $A_{r,i} \geq (A_{r,i})_{spec}$ であるときには、エキシマレーザ光源1におけるパルスエネルギーのばらつきが不良であるためステップ138に移行して、露光コントローラ26はエキシマレーザ光源1のエネルギーコントローラ1dに対してアラーム情報を送る。これに応じて、エネルギーコントローラ1dは、自己復帰動作に入る。一例として、エネルギーコントローラ1dは、シャッタ1fを閉じて発光動作を停止した後、レーザ発光を行う気体の濃度チェック等(セルフチェック)を行い、レーザ発振が正常に行われるようにする(セルフロック)。その自己復帰が完了すると、エネルギーコントローラ1dはその旨を露光コントローラ26に知らせ、これに応じてステップ127で次のショット領域の走査開始位置へのステッピングが行われ、以下そのショット領域への露光が行われる。

【0062】また、ステップ128で露光量再現性 $A_{r,i}$ が規格値 $(A_{r,i})_{spec}$ より小さいときには、露光量制御エラーの原因がショット領域内での平均パルスエネルギーのずれによるものなので、ステップ129において、露光コントローラ26は図4の積算露光量 S_i の平均積算露光量 S_{avg} を算出し、この算出結果を用いて次式よりインテグレータセンサ25を基準としたパルスエネルギーの平均値 P_r を求める。

$$P_r = S_{avg} / N \quad (12)$$

同様に、エキシマレーザ光源1側では、露光中にエネルギーコントローラ1dが各パルス発光毎にエネルギーモニタ1cの出力ESを蓄積し、エネルギーモニタ1cで

の設定露光量 S_r からの誤差が次のように積算露光量精度 A_r 以下かどうかを判定する。

【0059】

$$|1 - S_i / S_r| \leq A_r \quad (10)$$

(10)式が成立するときには、内部の各点での積算露光量が適正なショット領域であるため、次のショット領域の露光のためにパルスエネルギーの補正を行う必要はない。即ち、このショットは積算露光量の誤差が許容範囲内であるため、動作はステップ127に移行して次のショット領域の走査開始位置へのステッピングが行われ、その後ステップ122~125の露光動作が行われる。

【0060】しかしながら、ステップ126で(10)式が成立しないときには、その原因が各点での積算露光量間のばらつきによるものなのか、或いはショット領域中の平均パルスエネルギーのずれによるオフセット的なものなのかを判別するために、動作はステップ128に移行する。ここでは、そのショット領域中の最大積算露光量 S_{max} 、及び最小積算露光量 S_{min} を用いて次式より露光量再現性 $A_{r,i}$ を算出する。

【0061】

計測されるパルスエネルギーの平均値 E_r を得て露光コントローラ26に送る。その後、露光コントローラ26ではステップ130で露光量制御エラーの内容の解析を行う。ここで、図5(エラー原因識別マップ)を参照して制御エラーの内容を場合分けする。

【0064】図5は、インテグレータセンサ25で計測されたパルスエネルギーの平均値 P_r 、及びエネルギーモニタ1cで計測されたパルスエネルギーの平均値 E_r の可能な分布を示し、この図5において横軸は平均値 P_r (mJ/(cm²·pulse))、縦軸は平均値 E_r (mJ/pulse)である。そして、図5中のインテグレータセンサ25基準の設定パルスエネルギー P_r とエキシマレーザ光源1に対するエネルギー設定値 E_r とを有する計測データA(P_r , E_r)は、露光前に定めた目標データを示し、その他の計測データB, C, D, Eは直前のショット領域への露光終了時のインテグレータセンサ25及びエネルギーモニタ1cにより計測された平均パルスエネルギーの組み合わせの例を示している。また、直線31は、両平均パルスエネルギーの設計上の関係($E_r = \beta \cdot P_r$)を表す直線である。

【0065】また、直線32及び33はそれぞれ制御テーブル(変換係数 β)の許容できる誤差の下限及び上限に対応する直線であり、直線32及び33の傾き(変換係数)はそれぞれ $\beta(1-\delta)$ 及び $\beta(1+\delta)$ で表され、 δ は例えば露光量目標値精度 A_r の1/3等の量である。そして、直線32及び33で表されるエネルギーモニタ1cによるパルスエネルギーの平均値 E_r をそれぞれ許容できる平均値の下限 E^- 及び上限 E^+ とする

と、下限 E^- 及び上限 E^+ は次のように表される。

$$【0066】 E^- = \beta (1 - \delta) P \quad (13)$$

$$E^+ = \beta (1 + \delta) P \quad (14)$$

また、図5の横軸上で、露光量目標値精度 A_i 、及び設定パルスエネルギー P_i を用いて、 $P_i (1 - A_i) \leq P_i \leq P_i (1 + A_i)$ となる範囲が適正露光量が得られる範囲を示している。そして、 $P_i (1 - A_i) \leq P_i \leq P_i (1 + A_i)$ となる範囲内で、計測データBは直線32と直線33との間にあり、計測データCは直線33の上側にある（直線32の下側にあるときも同様）。また、 $P_i (1 + A_i) < P_i$ 、又は $P_i < P_i (1 - A_i)$ となる範囲内で、計測データDは直線32と直線33との間にあり、計測データEは直線33の上側にある（直線32の下側にあるときも同様）。計測データAに対するそれら4種類の計測データB、C、D、4の外れ方の意味は次の通りである。

【0067】(a) 計測データB：現在の制御テーブル（変換係数）、及びレーザエネルギーの制御精度共に許容範囲内であり、次のショット領域に対してパルスエネルギーの変調自体が必要なく、且つ制御テーブルの更新等も行ふ必要がない。ここで、図5において、計測データBでのパルスエネルギーの平均値 E_i の値を E_i' 、この平均値 E_i' に対応する直線31上の平均値 P_i の値を P_i' とすると、 P_i から P_i' に向かうベクトルLは、エキシマレーザ光源1におけるパルスエネルギーの制御誤差に起因し、 P_i' から計測データBに向かうベクトルTは現在の制御テーブルの誤差に起因する。他の計測データの誤差も同様に分解できる。

【0068】(b) 計測データC：現在の制御テーブルは許容範囲外であるが、ウエハ上でのパルスエネルギーの平均値が適正範囲内であり、結果として露光量制御は良好に行われている。

(c) 計測データD：現在の制御テーブルは許容範囲内であるが、ウエハ上でのパルスエネルギーの平均値が適正範囲を外れており、結果として露光量制御は不良である。

【0069】(d) 計測データE：現在の制御テーブル、及びウエハ上でのパルスエネルギーの平均値共に許容範囲外である。

以上のようにして、ステップ130では図5のエラー原因識別マップを用いて直前のショット領域に対する露光量制御エラーの内容が判別される。そして、上述の計測データB～Eに対する次ショットでの対処方法は以下のようになる。

【0070】先ず、ステップ131で示すように計測データB、又は計測データCが得られたときには、特に対処することなくステップ127に移行して次のショット領域への露光を行う。なお、計測データCが得られたときには、制御テーブルが許容範囲を外れているため、

(イ) で示した制御テーブルの作成を行って、直前のシ

ョット領域で使用した制御テーブルを更新するようにしてもよい。

【0071】また、ステップ132で示すように計測データDが得られたときには、ステップ133に移行して露光コントローラ26は、エキシマレーザ光源1のエネルギーコントローラ1dに対して、エネルギーモニタ1cに基づいたパルスエネルギー制御が正常に行われていない旨のアラーム情報を送る。これに応じて、エネルギーコントローラ1dは、ステップ138と同様の自己復帰動作に入る。その自己復帰が完了すると、エネルギーコントローラ1dはその旨を露光コントローラ26に知らせ、これに応じてステップ127以下で次のショット領域への露光が行われる。

【0072】一方、ステップ134で示すように計測データEが得られたときには、ステップ135に移行して露光動作を停止する。そして、次のステップ136でエキシマレーザ光源1のエネルギーコントローラ1dに対して、エネルギーモニタ1cに基づいたパルスエネルギー制御が正常に行われていない旨のアラーム情報を送る。これに応じて、エネルギーコントローラ1dは、ステップ138と同様の自己復帰動作に入る。その自己復帰が完了すると、ステップ137において露光コントローラ26は(イ)で示した制御テーブルの作成を実行して、直前のショット領域で使用された制御テーブルを更新する。その後、ステップ127に移行して次のショット領域への露光を行う。

【0073】なお、ステップ131で計測データCが得られた場合に制御テーブルの作成を行う際には、(イ)で説明した制御テーブル作成シーケンスに基づくのではなく、直前のショット領域で得られたその計測データCを用いてもよい。即ち、図5の計測データCでのインテグレートセンサ25基準のパルスエネルギーの平均値を P_i' 、エネルギーモニタ1c基準のパルスエネルギーの平均値を E_i' とすると、(5)式に基づいて E_i' / P_i' ($= \beta'$ とする)の値で変換係数 β を置き換えることによって、迅速且つ正確に制御テーブルを更新できる。

【0074】あるいは、前のショット領域で使用された変換係数 β に対して補正係数 η を乗ずる形式で制御テーブルを更新してもよい。この場合、 β' / β を η とすると、(5)式に対応する式は次のようになり、変換係数 β 、及び補正係数 η が制御テーブルとして記憶される。

$$E_i = \beta \cdot \eta \cdot P_i \quad (15)$$

【0075】(二) 広範囲に亘る設定露光量に対する露光量制御動作

以上の動作は、1枚のウエハ上の各ショット領域に全て同じ露光量を与える場合の動作であったが、例えばウエハ上のフォトレジストに対する適正露光量を定めるためには、ウエハ上の各ショット領域に対して設定露光量を所定幅ずつ変化させながらテストプリントを行う必要がある。そこで、設定露光量を変化させながらテストプリ

ントを行う場合の動作につき説明する。この場合、設定される露光量は広範囲に亘るため、エネルギー粗調器3による減光が必要になる。

【0076】しかしながら、エネルギー粗調器3のレボルバを回転してNDフィルタを切り換える場合、そのレボルバの位置決め誤差、及びNDフィルタの透過率の経時変化等によって、常に必要な精度でエネルギー粗調器3における透過率を所望の値に設定するのは困難である。言い換えると、オープンループ制御でエネルギー粗調器3における透過率を所望の値に設定するのは困難である。

【0077】また、図3に示すように、エネルギー粗調器3の開放時にはインテグレートセンサ25の処理量の値 P_i とエネルギーモニタ1cの出力の値 E_i とは広いレンジではぼりニアであるが、エネルギー粗調器3の透過率を切り換えた場合には、その透過率に応じてインテグレートセンサ25の処理量とエネルギーモニタ1cの出力との関係は大きく変化する。従って、より高精度に露光量制御を行うためには、レーザビームLBの光路上にエネルギー粗調器3の各NDフィルタを設定した状態で、インテグレートセンサ25の処理量 P ($\text{mJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{pulse})$)とエネルギーモニタ1cの出力 ES (mJ/pulse)との相関関係を表す制御テーブルを作成することが望ましい。そこで、エネルギー粗調器3の透過率を切り換えた場合に、その制御テーブルとしての(3)式の変換係数 β を求める動作の一例につき説明する。この動作は図6の動作に類似しているため、図6を参照して説明する。

【0078】この場合、先ず図6のステップ101と同様に、露光コントローラ26に対してウエハ上のフォトレジストに対する設定露光量 S_0 が設定される。それに応じて露光コントローラ26は、レーザビームLBの1パルス当たりのエネルギー設定値 E_0 を中心エネルギー E_c に設定する。次に、ステップ102と同様に、露光コントローラ26はエキシマレーザ光源1に複数回パルス発光を行わせて、インテグレートセンサ25の出力を積算することによって、間接的にウエハ上での平均パルスエネルギー密度 p_0 (mJ/cm^2)を計測する。その後、ステップ103に対応して次式より露光パルス数 N を算出する。

$$\text{【0079】 } N = \text{cint} (S_0 / p_0) \quad (16)$$

次に、ステップ104と同様に、その露光パルス数 N が、最小露光パルス数 N_{\min} 以上であるかどうかを調べる。そして、 $N < N_{\min}$ であるときには、ステップ105と同様に、エネルギー粗調器3中のNDフィルタより、 $N \geq N_{\min}$ を満たせるような透過率を有するNDフィルタを選択して、このNDフィルタをレーザビームLBの光路上に設定する。このときに設定されたNDフィルタの実際の透過率を T_{ND} とする。

【0080】その後、ステップ102と同様に、露光コ

ントローラ26は再びレーザビームLBの1パルス当たりのエネルギー設定値 E_0 を中心エネルギー E_c に設定する。そして、インテグレートセンサ25を介して、間接的にウエハ上での平均パルスエネルギー密度 p_0 (mJ/cm^2)を計測する。その後、ステップ103に対応して次式より露光パルス数 N を算出する。

【0081】

$$N = \text{cint} (S_0 / (T_{\text{ND}} \cdot p_0)) \quad (17)$$

また、その間接的にウエハ上での平均パルスエネルギー密度を計測する際に、1パルス毎、あるいは複数パルス毎に、エネルギーモニタ1cの出力とインテグレートセンサ25の出力とよりなる計測データを同時に蓄積する。一般にエキシマレーザ光源はパルス間で出力が $\pm 5\% \sim 7\%$ ばらつくため、そのように蓄積された計測データより、十分なレンジで(イ)の制御テーブルの作成を行うことができる。即ち、そのように蓄積された計測データより、(3)式の変換係数 β に対応する変換係数 β' が得られる。その後のシーケンスは図6を参照して説明した通りである。

【0082】(ホ)レーザエネルギーの微調整安定化さて、一般にエキシマレーザのような放電励起ガスレーザは、設定エネルギーを変えた場合、即ち、例えば図2のエキシマレーザ光源1では、高圧電源1eでの電源電圧の設定値の平均レベルを変えた場合は、発光されるレーザビームのエネルギーが所望のエネルギーに安定するまで、数10パルスの発光を要する。このようにパルスエネルギーが安定するまで発光されるパルス光を「プリパルス」と呼ぶ。

【0083】そこで、本例ではウエハ14の露光を開始する前にエキシマレーザ光源1のパルスエネルギーを安定化するために、ウエハ14上へのパルス照明光ILの照射を行わない状態でエキシマレーザ光源1にパルス発光を行わせる。このように、ウエハ14に対する露光が行われない状態でのエキシマレーザ光源1の発光を「ダミー発光」と呼ぶ。

【0084】この場合、エキシマレーザ光源1のパルスエネルギーの安定化に要するプリパルス数は予め最悪の状態を予想して一定数 N_{pr} としておく。更に、エキシマレーザ光源1の発光周波数を f (Hz)とすると、露光開始の N_{pr}/f (sec)前になったら、ダミー発光を開始すればよい。又は、ウエハ側のXYステージ20を基準にして、露光開始までの時間 N_{pr}/f の間でのXYステージ20の走査速度の平均値を V_x' とすると、XYステージ20が露光開始位置より $V_x' \cdot N_{pr}/f$ だけ手前に達したときにダミー発光を開始すればよい。

【0085】具体的に、本例の投影露光装置では、露光するレチクルパターン像を制限するために光路中に可動照野絞り9Bがあり、この可動照野絞り9Bはレチクルパターン像の露光開始に同期して開き始める。また、それより前に、ウエハ側のXYステージ20及びレチクル

ステージ15は等速走査に入る前の助走を始めている。そこで、XYステージ20及びレチクルステージ15の助走開始後、可動照野絞リ9Bが開き始める時点（露光開始時点）の N_{x1}/f (sec) 前になったら、又はXYステージ20が露光開始位置より $V_{x1} \cdot N_{x1}/f$ だけ手前に達したときにエキシマレーザ光源1のダミー発光を開始すればよい。これによって、レチクル11のパターン像がウエハ14上に転写される際には、レーザビームLBのパルスエネルギーが安定化されているため、ウエハ14上の各点で適正な積算露光量が得られる。

【0086】なお、上述の実施の形態では、ウエハ上のショット領域間でパルスエネルギーの微変調を行っているが、ウエハ上の各ショット領域への走査露光中にも、リアルタイムでインテグレートセンサ25及びエネルギーモニタ1cの出力を取り込み、この取り込んだ結果を順次解析して(3)式の変換係数 β （制御テーブル）を更新し、このように更新された変換係数 β に基づいて当該ショット領域への露光中にエキシマレーザ光源1でのパルス発光の微変調を行うことも可能である。

【0087】また、本発明は水銀ランプのような連続光源を露光光源とするステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置で、露光量制御を行う場合にも有効であることは言うまでもない。更に本発明は、ステッパーのような一括露光型の投影露光装置で露光量制御を行う場合にも適用できる。このように、本発明は上述の実施の形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得る。

【0088】

【発明の効果】本発明の第1の露光量制御方法によれば、露光用光源の発光パワーを微変調しているため、照明光の光路上で機械的な駆動によって透過率（減光率）を微調整するエネルギー微変調器を使用することなく高速に、且つ照明光の光路上でのエネルギー損失を伴うことなく露光用の照明光のエネルギー、ひいては感光基板上での露光量を微変調できる利点がある。

【0089】このとき、その感光基板上の複数のショット領域に順次露光を行う際に、それぞれ各ショット領域に対する照明光の照度をモニタし、このモニタ結果の目標値からのずれに応じて、その感光基板上の次のショット領域への露光の際にその露光用光源の発光パワーを微変調する場合には、直前のショット領域での露光量を次のショット領域での露光量にフィードバックすることによって、感光基板上の各ショット領域に対する露光量をそれぞれ高精度に制御できる利点がある。

【0090】また、本発明の第2の露光量制御方法によれば、露光用光源の内部又は直後での照明光の照度と、感光基板上でのその照明光の照度との相関テーブルに基づいて感光基板上での露光量を制御している。即ち、露光装置本体側の例えばインテグレートセンサのようなエネルギーモニタでの計測結果、及びその相関テーブルに

基づいて、例えばその露光用光源の内部のエネルギーモニタでの計測値の目標値を算出し、この算出結果に基づいてその露光用光源の発光パワーを微変調しているため、実質的にそのインテグレートセンサのようなエネルギーモニタを基準とした露光量制御の直線性が得られる利点がある。また、照明光の光路上で機械的な駆動によって透過率（減光率）を微調整するエネルギー微変調器を使用することなく高速に、且つ照明光の光路上でのエネルギー損失を伴うことなく感光基板上での露光量を微変調できる。

【0091】この場合、その感光基板への露光を行うことなくその露光用光源をダミー発光させたときにその相関テーブルを求めるときには、実際にその感光基板への露光を行う際の露光量制御をより正確に行うことができる。また、その露光用光源の内部又は直後での照明光の照度と、その感光基板上での照明光の照度との相関が変化すると予測されるときに、その相関テーブルを更新する場合には、経時変化で相関関係が変化しても、常に高精度に露光量を制御できる。

【0092】また、その第1の露光量制御方法において、その露光用光源はパルス発光型の光源であり、その露光用光源の発光パワーの設定値を変更する際には、その露光用光源の発光パワーが安定するのに必要なパルス数分だけその露光用光源をプリ発光させる場合には、その直後に露光するショット領域に対する露光量制御を高精度に行うことができる。特に、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置では、感光基板上の各ショット領域に対する露光を開始する前にステージ系が助走（加速）する期間があり、この期間にプリ発光を行うことができるため、本発明は特に有効である。

【0093】次に、本発明の露光量制御装置によれば、第1のエネルギーモニタ及び第2のエネルギーモニタを使用することによって、上述の本発明の第1、又は第2の露光量制御方法を実施できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態の一例で使用されるステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置を示す構成図である。

【図2】図1の投影露光装置の露光量制御系を示すブロック図である。

【図3】インテグレートセンサ25の処理量と、エネルギーモニタ1cの出力との相関データの一例を示す図である。

【図4】インテグレートセンサ25の処理量を積算して得られるウエハ上の各点に対する積算露光量の一例を示す図である。

【図5】直前のショット領域での露光におけるインテグレートセンサ25で計測されたパルスエネルギーとエネルギーモニタ1cで計測されたパルスエネルギーとの可能な分布を示す図である。

【図6】図1の投影露光装置で走査露光を行う際の通常の露光量制御動作の一例を示すフローチャートである。

【図7】図1の投影露光装置でショット領域毎に必要な応じて制御テーブルの更新を行う露光量制御動作の一例を示すフローチャートである。

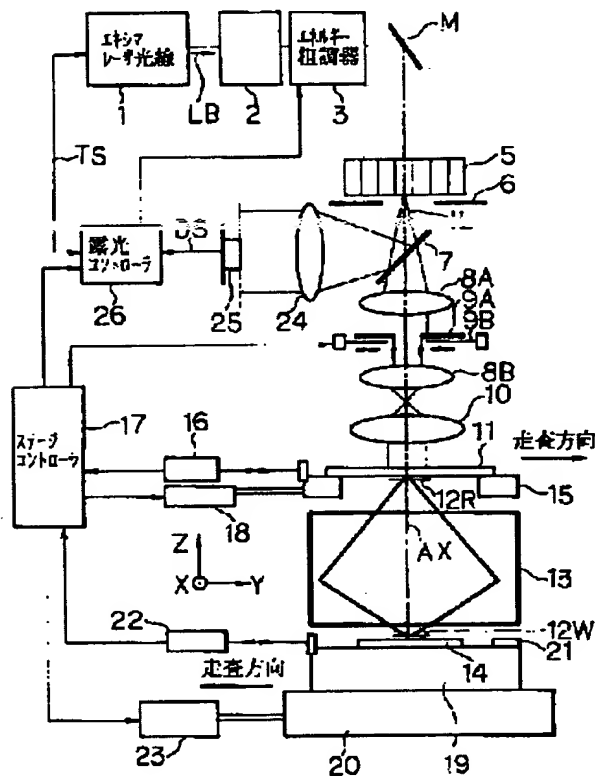
【図8】従来のエネルギー微変調器の2つの例を示す構成図である。

【符号の説明】

- 1 エキシマレーザ光源
- 1c エネルギーモニタ
- 1d エネルギーコントローラ
- 1e 高圧電源
- 2 ビーム整形光学系
- 3 エネルギー粗調器

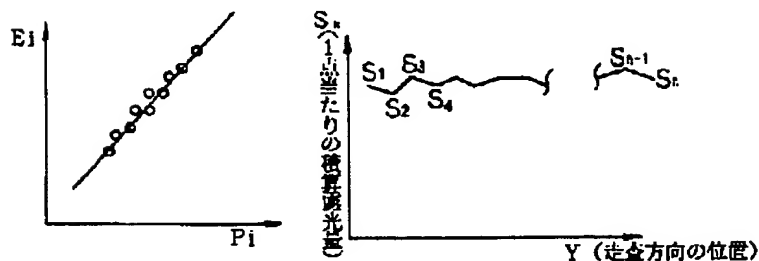
- 7 ビームスプリッタ
- 9B 可動照野絞り
- 10 コンデンサレンズ
- 11 レチクル
- 13 投影光学系
- 14 ウエハ
- 15 レチクルステージ
- 17 ステージコントローラ
- 19 Zチルトステージ
- 20 XYステージ
- 21 照度むらセンサ
- 25 インテグレータセンサ
- 26 露光コントローラ

【図1】

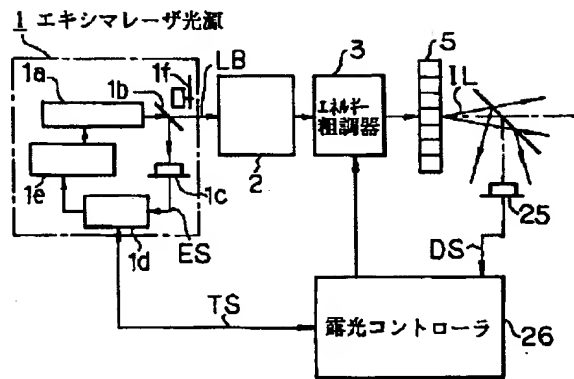


【図3】

【図4】

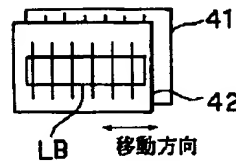


【図2】

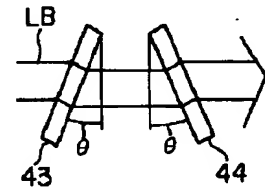


【図8】

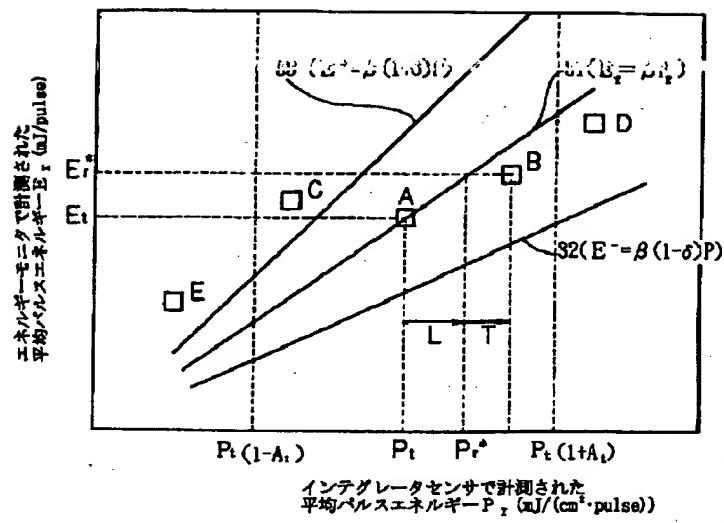
(a)



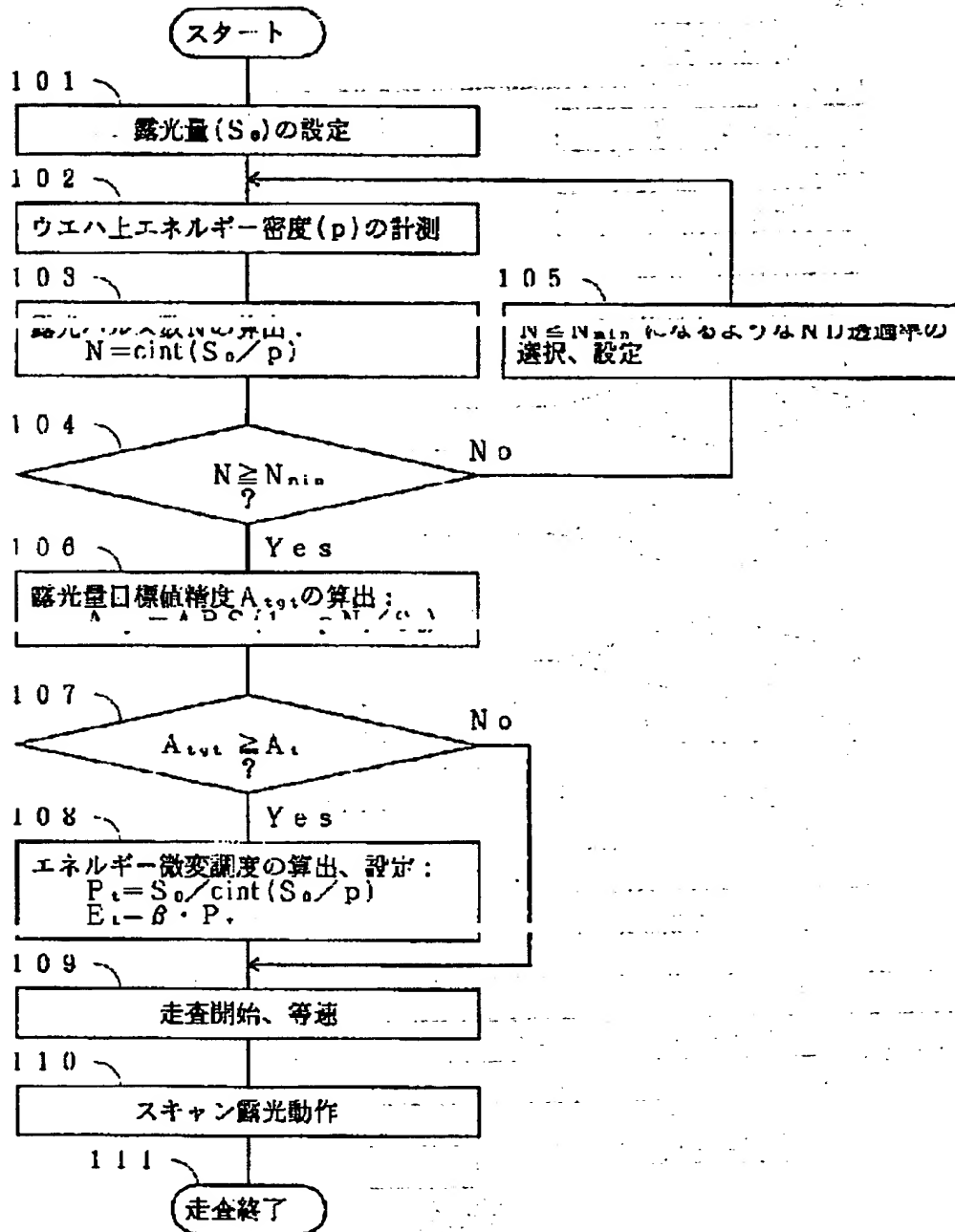
(b)



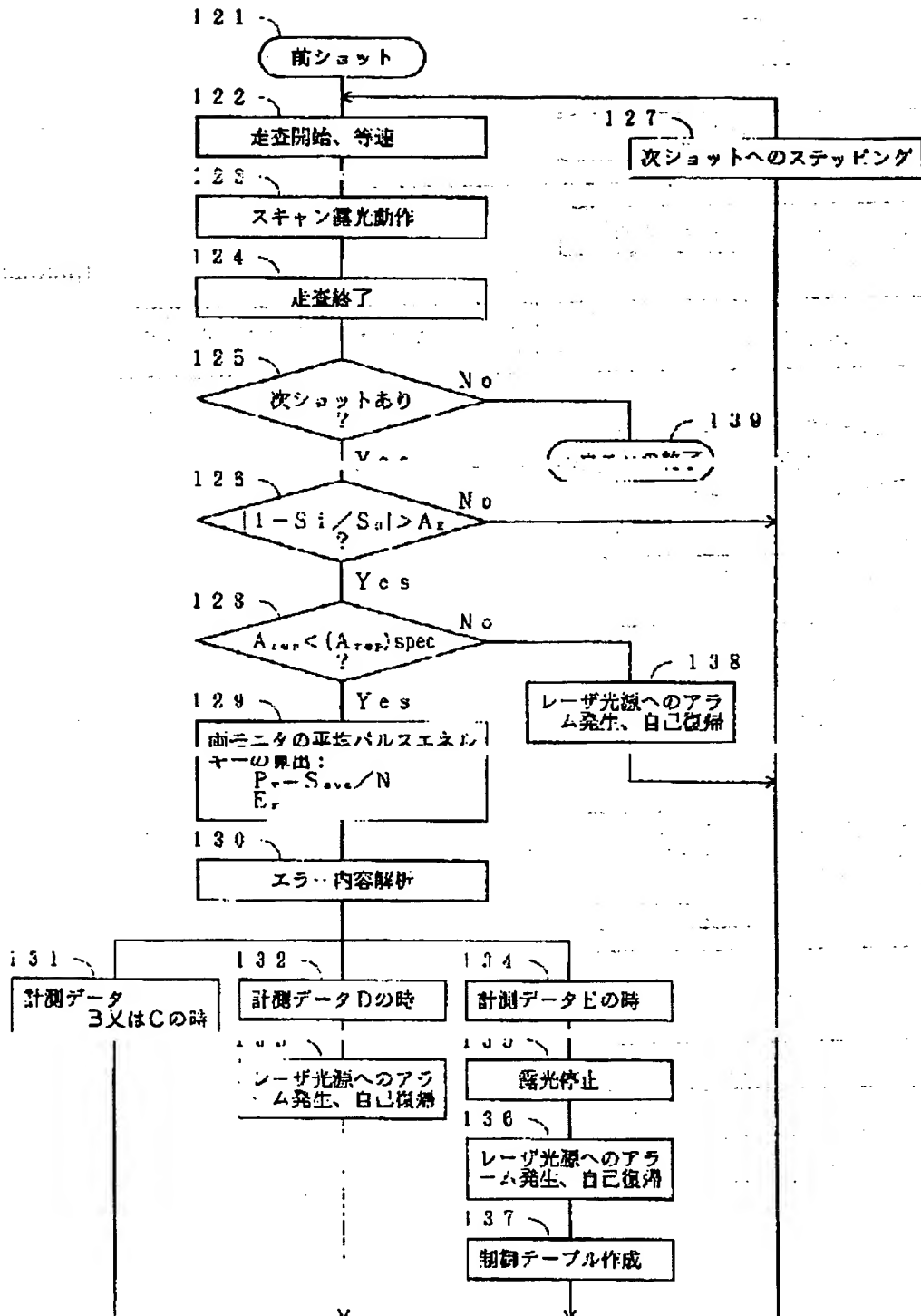
【図 5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. ⁶

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

518